陕西黄土区农田土壤主要养分特征及影响因素

贺军奇[1,2,3]， 拜寒伟[1,2,3]， 徐轶玮[4]， 倪莉莉[5]

（1. 长安大学水利与环境学院，陕西 西安 710054；2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室，陕西 西安 710054；3. 长安大学水利部旱区生态水文与水安全重点实验室，陕西 西安 710054；4. 陕西省科技交流中心，陕西 西安 710054；5. 陕西省耕地质量与环境保护工作站，陕西 西安 710003）

摘 要：为了探究陕西黄土区农田主要土壤养分特征及其影响因素，基于研究区5096个农田0~20 cm耕层采样点数据，利用GIS与地统计学方法对有机质（SOM）、全氮（TN）、有效磷（AP）和速效钾（AK）含量进行空间分析，并应用地理探测器模型探究18种影响因素对养分空间变异的解释程度。结果表明：SOM、TN、AP和AK含量均值分别为14.43 $g\cdot kg^{-1}$、0.92 $g\cdot kg^{-1}$、18.21 $mg\cdot kg^{-1}$和190.28 $mg\cdot kg^{-1}$，呈现中等程度变异；4种养分最佳拟合模型均为指数模型，各养分呈现中等程度空间相关性，结构性与随机性因素的共同作用导致了养分含量的空间差异；养分全局空间相关性大小表现为：TN>SOM>AK>AP；养分含量区域差异明显，呈现由北向南逐渐递增的趋势；年日照时长、年均气温、化肥用量和地貌类型等单因子作用对各养分含量空间变异具有更强的解释力，两因子交互作用对养分的解释力强于其单因子解释力。研究表明，陕北地区宜适当增加肥料投入，关中地区宜进行精耕细作，农田建设应考虑多方面因素。

关键词：土壤主要养分；空间变异；影响因素；地理探测器模型；陕西黄土区

农田土壤养分含量直接影响着农业生产效益和粮食安全，是衡量耕地质量的重要指标[1-2]。其中，SOM为作物提供各类养分并改善土壤理化性质，N、P、K是影响作物生长发育的关键养分[3]。受土壤属性、地形地貌和气候条件等随机性因素与施肥、灌溉和耕作制度等结构性因素的共同作用，土壤养分呈现出一定的空间异质性[4]。了解农田土壤养分空间分布、变异特征及其影响因素作用对农田土壤健康可持续发展及推动农业高质量发展具有重要意义[5]。

近年来，大量学者对农田土壤养分分布状况及影响因素进行了研究。研究对象包含SOM、N、P、K等主要养分[6-7]及Fe、Mn、Cu、Zn等微量元素[8-9]，研究范围覆盖了田块[10]、果园[11]、大小流域[12]、各级行政区域[13-16]等尺度。地统计方法和GIS技术克服了传统统计学解释养分空间变化上的缺陷，是当前土壤养分空间分析较为有效的方法之一[4]。冗余分析[1]、皮尔逊相关性分析[9]、回归分析[13]、主成分分析[17]、方差分析[18]等方法被广泛应用于农田养分影响因素研究。地理探测器模型[19]在农田养分研究上的应用相对较少，相比于其他方法，此方法无线性假设，可为土壤养分影响因素研究提供更合理的解释[20]。黄土区作为黄河流域重要的生态单元，其农田养分研究备受关注。尉芳等[21]运用地统计方法对渭北黄土区农田土壤SOM进行研究，发现研究区SOM总体上呈现南高北低的空间格局并揭示了其最优预测模型；解文艳[12]等对黄土高原潇河流域农田土壤SOM进行了研究，发现在该尺度下施肥等因素对SOM含量具有更强影响。

当前，大多研究聚焦于中小尺度上的SOM，大尺度下同时考虑区域多类养分的研究较少，因而难以为农田精准施肥提供更全面的指导，大尺度农田土壤养分分布规律有待进一步揭示[22]。此外，大多研究仅选择了部分影响因素，并未全面考虑各类因素的影响。鉴于此，本文以陕西黄土区为研究对象，考虑多类影响因素，研究其农田主要土壤养分特征及其影响因素作用，拟解决以下问题：（1）了解主要养分空间分布格局，为区域精准施肥提供理论

收稿日期：2023-06-06； **修订日期：**2023-09-11
基金项目：国家自然科学基金项目（41901034，42001033）；陕西省哲学社会科学研究专项（2022HZ1859）
作者简介：贺军奇（1978-），男，副教授，主要从事干旱区农田水利研究. E-mail: hejunqi@chd.edu.cn

依据;(2) 通过地理探测器模型探究大尺度下各类因素与农田土壤养分的关系,为陕西黄土区农田工程建设及农业土壤养分管理提供参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

陕西黄土区位于黄土高原中部,地处33°42′~39°35′N,106°18′~111°15′E之间(图1),高程范围为207~3754 m,南北跨度大,东西狭窄,总面积约13×10^4 km^2,占全省面积的3/5,占黄土高原面积的1/5。区域主要农业土壤类型包括陕北的黄绵土和风沙土、关中平原的褐土、河谷滩地的潮土和新积土。按地貌类型,研究区由北至南划分为:长城沿线风沙滩区、陕北黄土丘陵沟壑区、渭北黄土台塬区和关中平原区;按气候条件可依次划分为:长城沿线温带半干旱气候区、陕北高原暖温带半干旱气候区和关中平原暖温带半湿润气候区。

1.2 样品采集及数据获取

1.2.1 养分指标选取与土壤样品采集 SOM、TN、AP、AK的丰缺程度是决定土壤肥力的重要因素,直接影响农作物的生长发育,被广泛选取作为农田土壤肥力研究的重要指标[13]。此外,4种养分均属于陕西省耕地质量评价中的主要土壤养分,故本文以该4类养分为研究对象。结合研究区行政区位与土地利用现状,综合考虑地形、气候、土壤性质等因素布设采样点,于2020年农作物收获后采集0~20 cm耕层土壤样品,采样时用GPS记录点位坐标及高程,并记录各样点的土壤类型和作物类型等,本次共采集5096份样品,采样位置见图1。样品采集及养分检测工作由陕西省农业厅耕地质量与农业环境保护工作站实施完成。

1.2.2 影响因子选择与获取 综合以往的研究成果及研究区实际情况,选择18种影响因子如表1所示。

土壤属性数据及人为活动中的灌溉方式、作物类型和熟制数据来源于陕西省农业厅耕地质量与农业环境保护工作站2020年耕地质量监测资料。坡度、坡向和地形起伏度通过空间地理数据云(http://www.Gscloud.cn/)下载的30 m ASTER GDEM在ArcGIS 10.7中提取;2020年气象数据从中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)下载,在ArcGIS 10.7中提取采样点位年日照时长、年降雨量、年平均气温、年蒸发量;地貌类型分区通过陕西省农业农村厅官网(http://nynct.shaanxi.gov.cn/)发布的关于农田建设的相关信息确定;区(县)化肥使用量通过各市区统计年鉴整理而得。

1.3 研究方法

1.3.1 半方差函数分析 地统计学中的半方差函数分析能够揭示结构性因素与随机性因素对空间养分含量变化的影响程度[23]。其计算公式如下:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}\left[Z(x_i)-Z(x_i+h)\right]^2 \tag{1}$$

式中:$\gamma(h)$表示半方差函数值;h表示两采样点的间距(或称为步长);$N(h)$表示间距为h的数据配对数;$Z(x_i)$、$Z(x_i+h)$分别表示变量$Z(x)$在空间区位x_i和x_i+h处的实测值。半变异函数的重要参数包括块

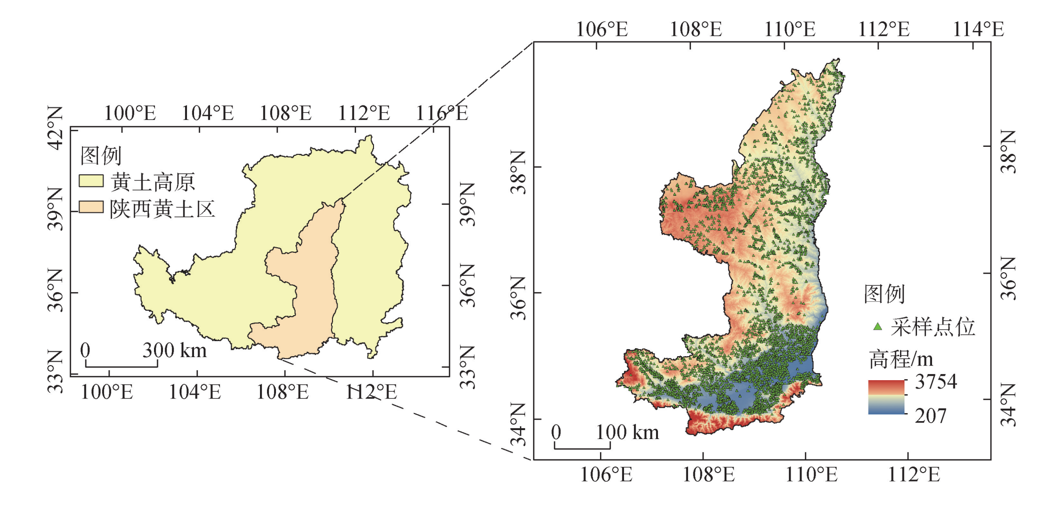


图1 研究区区位及采样点分布

Fig. 1 Distribution of study sites and sampling sites

表1 土壤养分影响因子

Tab. 1 Soil nutrient impact factors

类型	变量	影响因子	单位/分类
土壤属性	pH	$X1$	-
	土壤容重	$X2$	$g·cm^{-3}$
	土壤类型	$X3$	潮土、风沙土、黄绵土、新积土、褐土、黑垆土、红黏土、水稻土
	成土母质	$X4$	黄土母质、风沙母质、冲积母质、湖积母质、残积母质、坡积母质、红土母质
	土壤质地	$X5$	砂土、砂壤土、轻壤土、中壤土、重壤土、黏壤土、黏土
气候因素	年日照时长	$X6$	h
	年降雨量	$X7$	mm
	年平均气温	$X8$	℃
	年蒸发量	$X9$	mm
地形因素	高程	$X10$	m
	坡度	$X11$	°
	坡向	$X12$	阳坡(0°~45°、315°~360°)、半阳坡(45°~90°、270°~315°)、半阴坡(90°~135°、225°~270°)、阴坡(135°~225°)(以正北方向为基准)
	地表起伏度	$X13$	m
	地貌类型	$X14$	长城沿线风沙滩区、陕北黄土丘陵沟壑区、渭北黄土台塬区、关中平原区
人为活动	化肥用量	$X15$	$kg·hm^{-2}$
	灌溉方式	$X16$	无灌溉、漫灌、畦灌、滴灌、沟灌、喷灌
	作物类型	$X17$	谷类作物、果蔬作物、薯类作物、药用作物、豆类作物、油料作物、其他
	熟制	$X18$	一年一熟、一年两熟、一年三熟、两年三熟、多年生

金值C_0、基台值C_0+C、变程A、块金系数$C_0/(C_0+C)$、决定系数R^2。其中,块金系数$C_0/(C_0+C)$用来反映变量的空间相关性[24]。

1.3.2 空间自相关分析 为反映陕西黄土区土壤养分在整体空间上的聚集状态,采用全局 Moran's I 指数进行计算分析[25]。其公式如下:

$$I=\frac{N\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}W_{ij}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(x_j-\bar{x}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}W_{ij}\right)\sum_{i=1}^{N}\left(x_j-\bar{x}\right)^2} \tag{2}$$

式中:N为样本数;W_{ij}为空间权重;x_i、x_j为i和j处养分含量实测值;$\bar{x}$为养分均值。Moran's I 指数值域为[-1,1],用以表示养分空间分布的相关性,通常采用Z得分检验指数显著性。

1.3.3 空间聚类分析 通过局部Moran's I 指数能够反映区域局部空间自相关性从而进行养分空间聚类分析和空间异常值识别[26],公式如下:

$$I=\frac{N\left(x_i-\bar{x}\right)\sum_{j=1}^{N}W_{ij}\left(x_j-\bar{x}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(x_i-\bar{x}\right)^2} \tag{3}$$

1.3.4 地理探测器模型 地理探测器模型以统计学手段对数据空间分异性进行探测,并有效地描述现象背后各影响因素的驱动力强弱[19]。因子探测器用于探测影响因子X对因变量Y的解释程度(解释力),度量指标用q统计量表示,q的值域为[0,1],值越大,因子解释力越强[20],其公式如下:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2}=1-\frac{SSW}{SST} \tag{4}$$

式中:h表示影响因子分层数(h=1, 2,$\cdots$, L);σ_h^2为影响因子在第h层时的因变量的方差;σ^2为因变量在全范围的方差;N为所有因子的数量;N_h为第h层时因子数量;SSW为因子层内方差之和;SST为总体方差之和;q为因子对因变量Y的影响力。

交互探测器描述两因子共同作用对因变量的解释程度。通过叠加两因子分层重新计算q值,将两因子共同作用的q值与单因子q值对比,判断交互作用强弱。根据对比,将交互作用分为5类,如表2所示[21]。

1.4 数据处理

对5096份采样数据采用3倍标准差法与邻近点数据比较法剔除各类土壤养分数据异常值,剔除异常值后SOM、TN、AP、AK样本数分别为5079份、5084份、4995份、5020份。通过SPSS 27.0进行统计性描述,通过GS+9.0进行半变异函数分析,在Arc-

表2 双因子交互作用类型

Tab. 2 Type of two-factor interactions

判断依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2)>q(X_1)+q(X_2)$	非线性增强
$q(X_1)+q(X_2)>q(X_1 \cap X_2)>\max[q(X_1),q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2)=q(X_1)+q(X_2)$	相互独立
$\max[q(X_1),q(X_2)]>q(X_1 \cap X_2)>\min[q(X_1),q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2)<\min[q(X_1),q(X_2)]$	非线性拮抗

GIS 10.7中进行土壤养分空间自相关分析、养分空间插值和空间聚类分析，通过R语言构建地理探测器模型探讨各因素对土壤养分含量的影响。

2 结果与分析

2.1 土壤养分统计特征

土壤养分统计特征分析（表3）表明，SOM、TN、AP和AK含量均值分别为14.43 g·kg^{-1}，0.92 g·kg^{-1}，18.21 mg·kg^{-1}，190.28 mg·kg^{-1}。与全国二次土壤普查养分分级标准进行对比，SOM与TN处于Ⅳ等（较低）水平，AP与AK分别为Ⅲ等（中等）、Ⅱ等（较高）水平。4种养分变异系数分别为：42.27%、42.39%、79.90%和56.88%。根据Nielsen(1985)划分标准[15]，C_v≤0.1为弱变异，0.1＜C_v≤1为中等程度变异强度，C_v>1为强变异，各项土壤养分指标均属于中等变异水平，AP和AK相对于SOM和TN变异强度较高，说明两者存在更明显的区域差异。在后续地统计分析中需要对数据进行正态处理，否则可能导致变异函数分析和空间插值的偏差[24]。偏度系数表示数据的偏斜程度，峰度系数表示数据的陡峭程度，偏度越趋于0，峰度越趋于3，数据越近似服从正态分布[27]，对AP与AK进行对数转化后，4种养分含量均近似服从正态分布。

2.2 土壤养分空间变异及分布特征

2.2.1 基于半方差模型的土壤养分空间变异特征　通过GS+9.0对研究区养分分布状况进行半方差分析，结果如表4所示。分析结果表明，4种养分的最佳拟合模型均为指数模型。SOM、TN、AP、AK的R^2均趋近于1，拟合效果优良。各养分块金值C_0均大于0，这是由于采样误差、实验误差及最小取样间距内的人为随机因素所导致的空间变异[3]。块金系数$C_0/(C_0+C)$表示随机变量导致的变异在总变异中所占的比例[1]，4种养分的块金系数位于0.25~0.75之间，表明养分含量呈现中等程度相关性，变异性同时受土壤属性、气候条件、地形条件等结构性和人为活动类随机因素的影响。AK块金系数为0.68，相对偏大，说明其受人为活动影响相较其他养分更大。4种养分分别在40.8 km、58.9 km、92.4 km、67.3 km的范围内具有相关性。

2.2.2 土壤养分空间自相关分析　Moran's I指数大于0表示养分空间分布为正相关，在空间上呈聚集趋势；小于0表示养分空间分布为负相关，在空间上呈分散趋势；等于0表示养分含量之间不相关，空间上趋于随机分布。在0.01置信水平下，$|Z|>1.96$、2.58分别表示养分含量呈现显著自相关性、极显著自相关[28]。研究区全局Moran's I指数及标准化Z值如表4所示，各养分全局Moran's I指数值均大于

表3 陕西黄土区土壤养分含量统计特征

Tab. 3 Statistical characteristics of soil nutrient content in the Loess Plateau of Shaanxi Province

指标	样本数	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%	分布类型	偏度	峰度
SOM/(g·kg^{-1})	5079	32.97	1.26	14.43	6.10	42.27	正态分布	−0.10	2.52
TN/(g·kg^{-1})	5084	2.10	0.04	0.92	0.39	42.39	正态分布	−0.18	2.50
AP/(mg·kg^{-1})	4995	71.28	0.04	18.21	14.55	79.90	对数正态	−0.42	3.50
AK/(mg·kg^{-1})	5020	550.00	18.00	190.28	108.24	56.88	对数正态	0.04	2.56

表4 半方差函数模型参数及全局Moran's I指数

Tab. 4 Semi-variance function model parameters and the global Moran's I index

指标	理论模型	块金值C_0	基台值C_0+C	块金系数$C_0/(C_0+C)$	变程A/km	决定系数R^2	残差平方和RSS	全局Moran's I	Z
SOM	指数模型	0.1941	0.3892	0.4987	40.8	0.979	3.79×10^{-4}	0.58	86.31
TN	指数模型	0.0134	0.0231	0.5931	58.9	0.995	3.31×10^{-6}	0.61	90.90
AP	指数模型	0.3530	0.7070	0.4993	92.4	0.994	5.56×10^{-4}	0.31	44.79
AK	指数模型	0.1573	0.2299	0.6842	67.3	0.964	2.46×10^{-4}	0.36	53.40

0,且|Z|值大于2.58,表明4种土壤养分均呈现极显著正相关,即某一小区域土壤养分含量值高低会受到周围同一养分含量值高低的正影响。养分全局Moran's I指数值表现为:TN(0.61)>SOM(0.58)>AK(0.36)>AP(0.31),TN、SOM空间聚集现象相对于AP和AK更明显。

2.2.3 土壤养分含量空间分布特征　根据半方差模型拟合所得结果参数,采用普通克里金法进行空间插值,通过自然间断点法将土壤养分含量分为5个级别(图2)。4种养分含量总体区域差异明显,呈现南高北低的特征。SOM和TN的空间分布特征相似,这是因为SOM的积累与分解对氮元素的存储和转化有着直接影响,因而对土壤氮素含量有着主导作用[29]。榆林地区及延安北部两者含量相对匮乏,多处于Ⅳ、Ⅴ级标准,延安南部和榆林西侧的局部风沙滩区呈Ⅲ级标准,含量中等;位于关中平原地区的西安、宝鸡、渭南三市及其周边区域2种养分含量整体处于Ⅰ、Ⅱ级标准,含量稍丰,并向南呈现递增趋势。AP含量Ⅳ、Ⅴ级标准区域面积较大,其中,Ⅴ级标准多位于延安及榆林东侧,Ⅰ、Ⅱ级含量多分布于西安市南侧边缘。AK含量由西北向东南呈现递增趋势,低值分布在榆林和延安西侧,高值分布于东南平原区域。

2.2.4 土壤养分空间聚类分析　基于普通克里金插值结果,以(区)县为评价单元,将(区)县内插值结果的平均值空间连接到评价单元,并进行局部Moran's I指数计算,形成LISA聚类图(图3)。空间聚类分析将研究区划分为:不显著、高-高型、高-低型、低-高型、低-低型5类区域,分别表示区域之间高低值无显著相关性、高值聚集、自身高值但周围

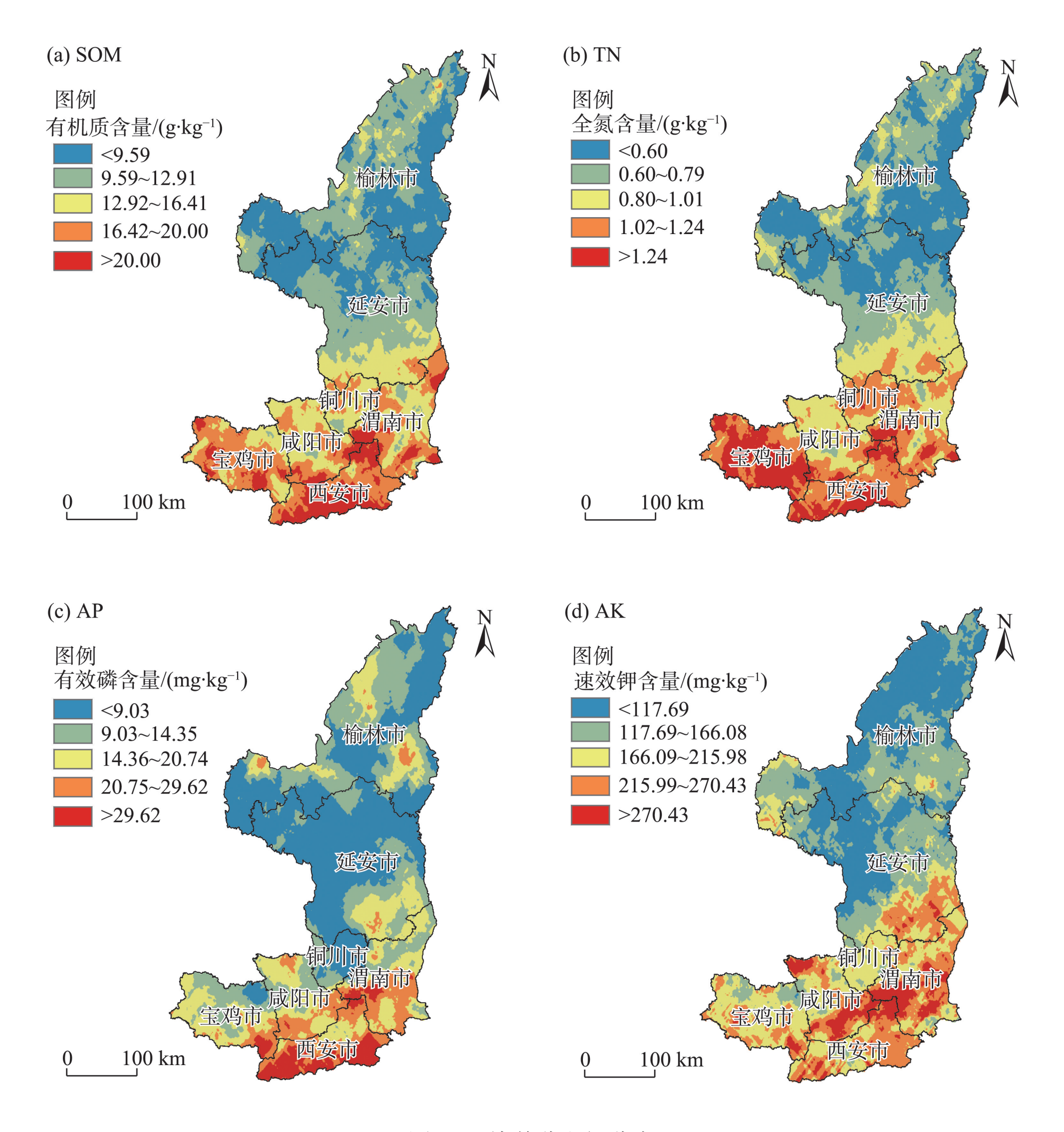


图2　土壤养分空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of soil nutrients

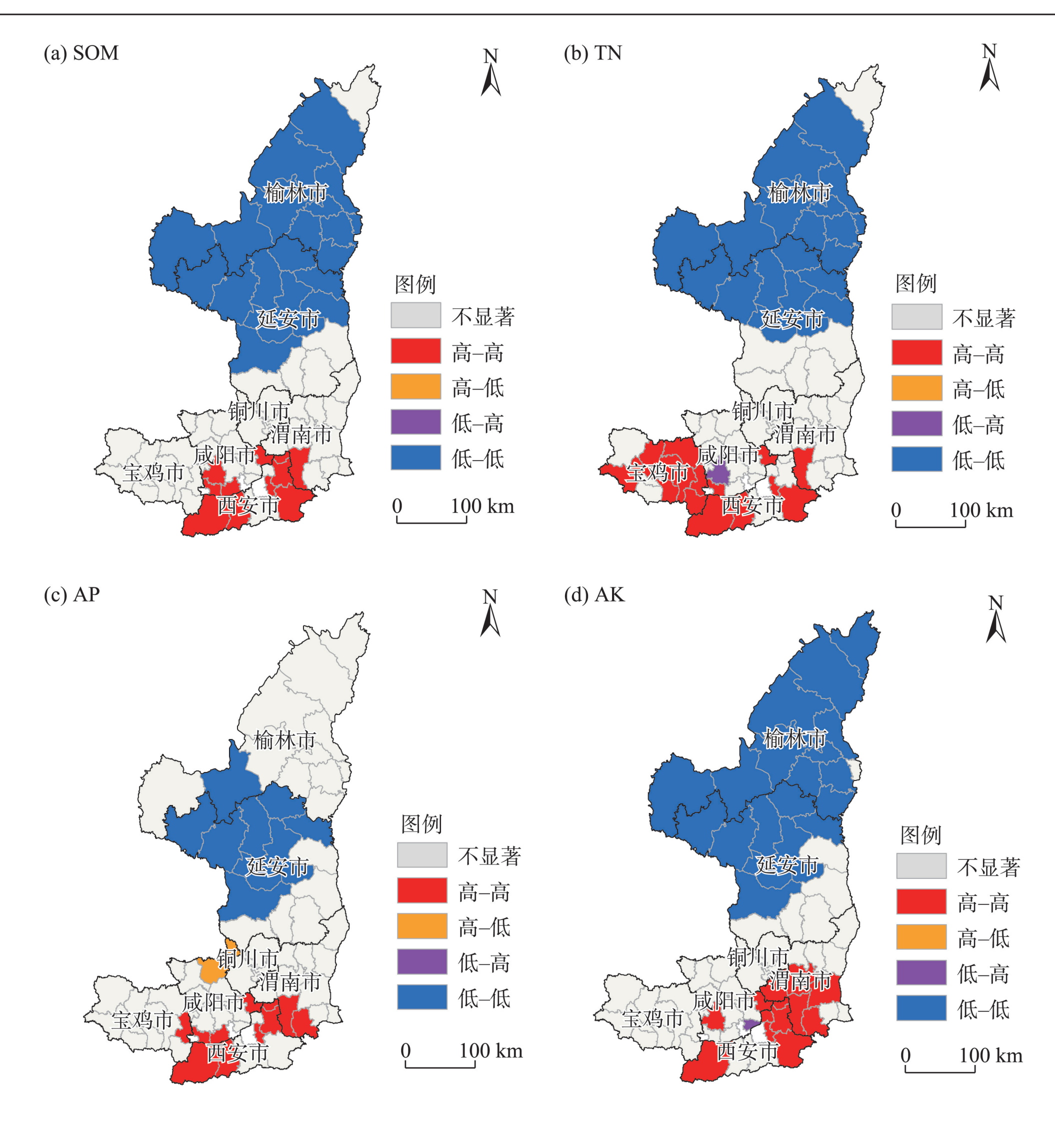


图3 陕西黄土区农田土壤养分LISA聚类分布

Fig. 3 LISA cluster distribution of farmland soil nutrients in the Loess Plateau of Shaanxi Province

低值、自身低值但周围高值、低值聚集。该方法常以LISA聚类图反映研究区局部土壤养分之间的关联性[25]。结果表明,SOM与TN聚集特征较为相似,低值聚类区均分布于榆林地区及延安北部,高值聚类区分布于西安市及其周边,TN高值聚类区也包括了宝鸡市大部分区域。AP低值聚类分布于研究区中西部地区,高值聚类区多分布于西安市及其周边,在咸阳市北部有小部分高-低值区。AK低值聚类区分布于榆林及延安西北范围,高值聚集区多分布于西安、咸阳、渭南三市。

2.3 土壤养分影响因素分析

2.3.1 单因子作用探测 通过因子探测器计算18种影响因子对SOM、TN、AP和AK空间分布的q统计量以表示其解释力,除坡向因素对4种养分含量的影响力不显著(P>0.01)外,其他因子均达到显著水平(P<0.01)。因子探测结果(图4)表明,各影响因子对区域养分空间分异的解释力(q值)存在明显差异。总体来看,各因子对SOM和TN的解释力显著大于AP和AK,这说明各因素在农田SOM与TN循环过程中参与度相对于AP和AK更高。就单一影响因素而言,对SOM解释程度最高的5类因子依次为:年日照时长(0.44)、地貌类型(0.42)、年气温(0.35)、化肥用量(0.34)、作物熟制(0.30),对TN解释程度最高的5类因子依次为:年日照时长(0.46)、化肥用量(0.37)、地貌类型(0.36)、年气温(0.32)、年蒸发(0.26);对AP解释程度最高的5类因素分别为:年气温(0.17)、高程(0.17)、地貌类型(0.16)、化肥用量(0.14)、年日照时长(0.14);对AK解释程度最高的5类因子分别为:年气温(0.25)、年日照时长(0.24)、高程(0.22)、化肥用量(0.21)、地貌类型

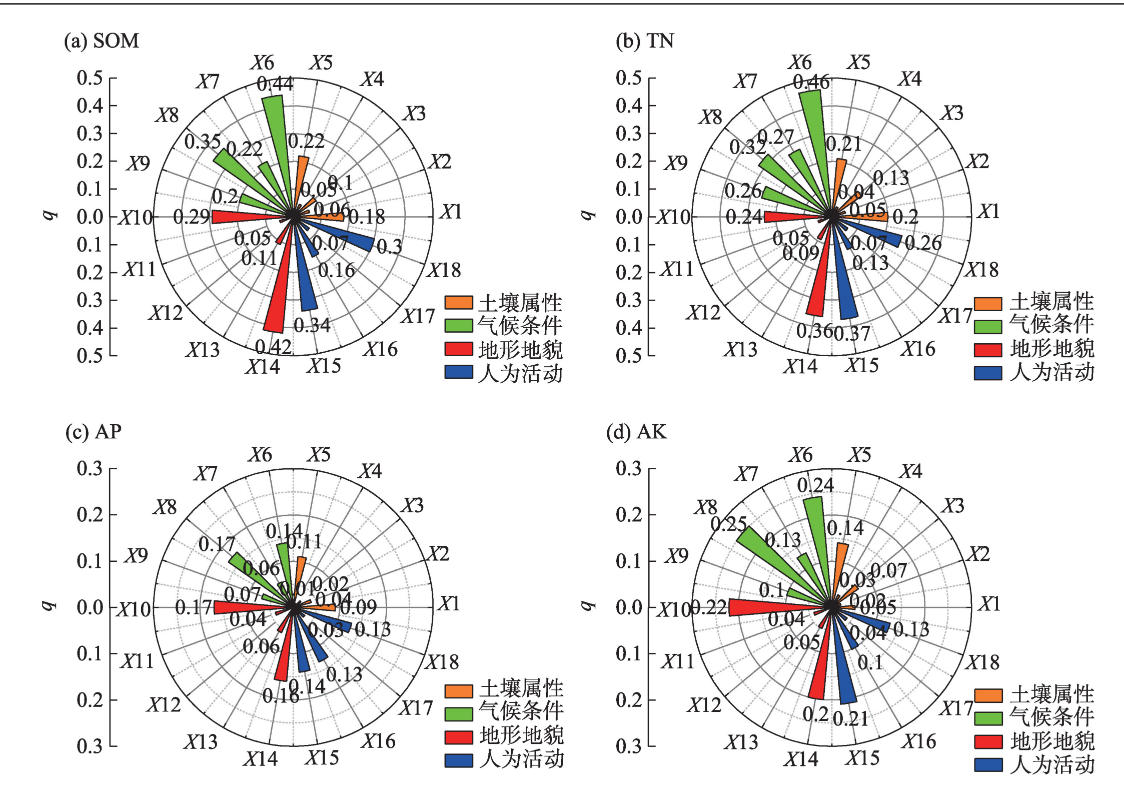


图4　陕西黄土区农田养分影响因子q值

Fig. 4　q-value of nutrient influence factor in the Loess Plateau of Shaanxi Province

(0.20)。对4类养分解释位于前5的因素均包含了年日照时长、年均温度、地貌类型、化肥用量。

2.3.2　交互作用探测　通过交互探测器探究各影响因素对土壤养分含量属于独立作用还是相互作用,如果是相互作用,是增强还是减弱。列出各养分前5的交互作用因子如表5所示。

根据表5可知,因子的交互作用对SOM与TN空间分异的解释力更强,位于前5的q值均大于0.45;而对于AP和AK,因子交互作用的影响稍弱,分别位于0.22与0.30左右。对SOM解释最大的交互作用因子为pH与年均日照时长(0.496),大于pH(0.18)与年均日照时长(0.44)单因子作用,说明两因子交互作用对养分的解释相比于单因子作用的解释力显著提升。对TN解释最大的交互作用因子与有机质相同(q值为0.535),这一方面是因为两因素对TN含量的直接影响,另一方面是其作用于SOM,间接的影响了TN的空间差异。AP与AK受年均温度与化肥用量的交互影响最大,q值分别为0.229与0.303,说明人为因素与自然因素的交互对两养分有更强的解释力。交互因子作用热图(图5)表明,各类因

表5　不同土壤养分因子交互作用探测

Tab. 5　Interaction detection of different soil nutrient factors

交互作用	SOM		TN		AP		AK	
	q	交互类型	q	交互类型	q	交互类型	q	交互类型
交互作用1	X1∩X6 0.496	双因子增强	X1∩X6 0.535	双因子增强	X8∩X15 0.229	双因子增强	X8∩X15 0.303	双因子增强
交互作用2	X14∩X15 0.492	双因子增强	X6∩X15 0.512	双因子增强	X10∩X14 0.227	双因子增强	X10∩X15 0.299	双因子增强
交互作用3	X6∩X18 0.487	双因子增强	X2∩X6 0.506	双因子增强	X1∩X8 0.226	双因子增强	X6∩X10 0.298	双因子增强
交互作用4	X1∩X12 0.479	双因子增强	X5∩X6 0.505	双因子增强	X1∩X10 0.225	双因子增强	X7∩X8 0.295	双因子增强
交互作用5	X1∩X15 0.478	双因子增强	X6∩X9 0.498	双因子增强	X15∩X16 0.222	双因子增强	X6∩X8 0.294	双因子增强

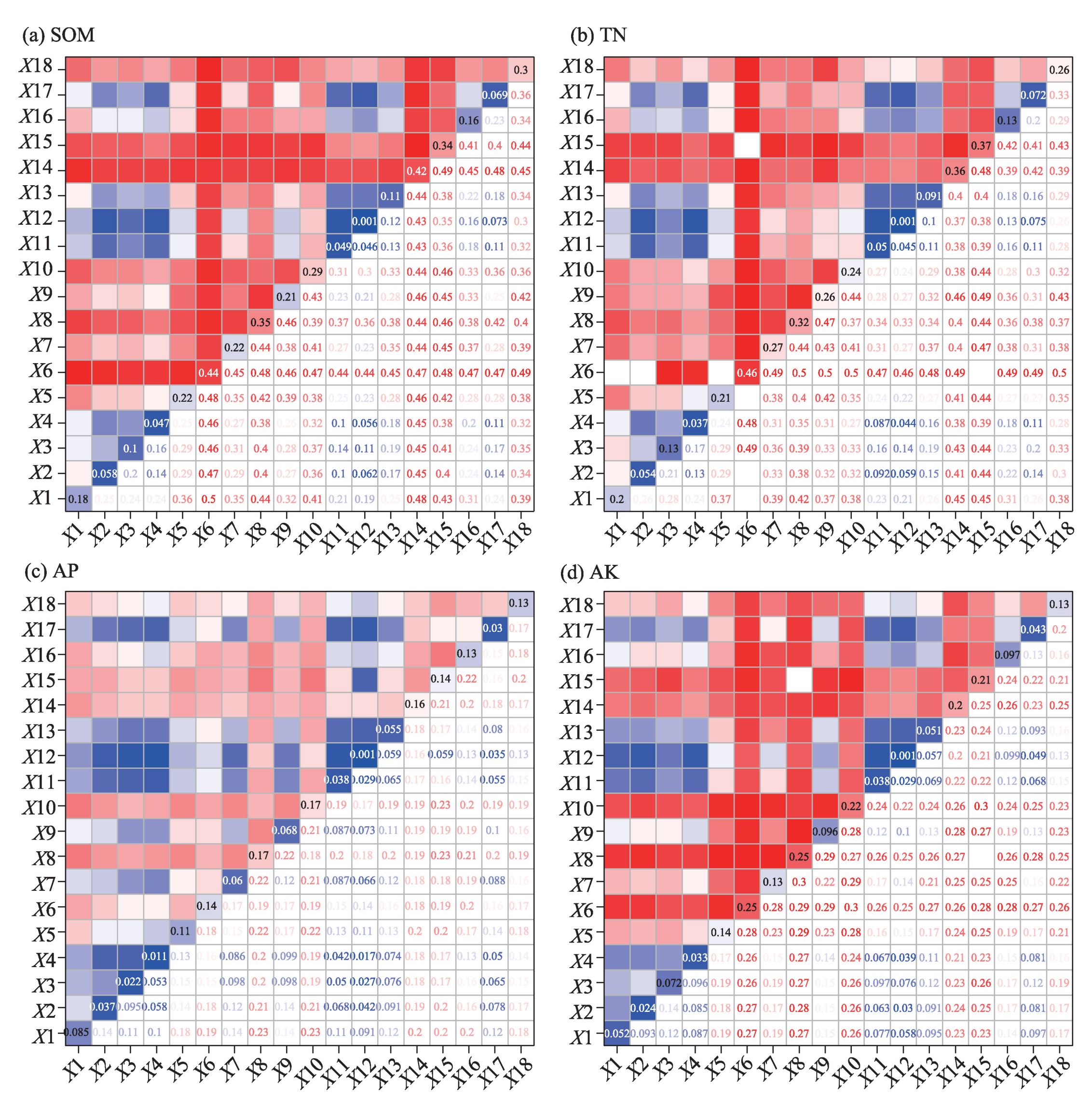


图5 土壤养分因子交互作用

Fig. 5 Soil nutrient factor interaction diagram

子对陕西黄土区农田养分的交互作用解释力均高于单因子作用，表现为双因子增强与单因子非线性增强。

3 讨 论

空间格局及变异特征方面，统计分析表明，陕西黄土区农田土壤养分整体偏低，其原因与区域复杂的土壤、气候、地形等自然条件和粗放的耕作方式、管理制度等人为因素密切相关[30]。AP的变异系数为79.90%，显著高于其他养分，这是因为磷元素易被土壤固定且更容易受人为施肥、灌溉等因素影响[26]。从理论来看，陕西黄土区南北地形地貌、气候差异明显，土壤养分应受结构性因素影响程度更高，但半方差函数模型的结果表明，4种养分均呈现中等程度相关性，养分含量受结构作用与随机作用共同影响，导致这一差异的主要原因可能是由于长期的环境保护与农业栽培管理使土壤养分发生了一定的变化，因而随机因素的影响逐渐加强[23]。养分的空间格局分布与聚类状况表明，榆林与延安北部4类养分缺乏，这可能是由于该地区多为风沙土与黄绵土，土壤本身贫瘠，且环境条件使得养分流失较为严重[15]。秸秆还田及施用有机肥不仅可以为农田土壤养分提供丰富的有机质及氮磷钾，还可以改善土壤结构，适合在当地推广[12]。西安、宝鸡、渭南一带，地处关中平原，潮土、褐土等土壤养分含量丰富，且地势相对平坦，土壤保水保肥能力强，因

而多为养分富集区[31]。

影响因素方面,土壤属性通过决定保水保肥、通气和耕作难易程度影响土壤养分含量[14]。土壤质地相比于其他土壤属性解释力更高,这是因为质地较轻的土壤通透性较大,更易发生SOM的矿化和其他养分的流失,不利于养分积累,而质地较重的土壤往往黏粒含量高,更容易吸附和固定SOM等养分[18]。气候条件往往可以决定养分空间大格局,日照时长、降水量、温度、蒸发等通过影响作物光合作用、区域水热平衡、微生物作用进而影响养分含量[15]。其中,日照时长作用最为明显,研究区内养分含量总体上随日照时长的降低而增高。地形地貌主要通过影响水分与太阳辐射的空间再分配从而影响养分含量,其中,地貌类型与高程在一定区域内控制着气候、土壤、水文等因素的地域性差异,是制约农田养分的重要因素[14]。人为活动方面,化肥用量作为耕地养分的直接来源,对养分含量空间差异具有更强的解释力,而耕作模式、管理制度等因素也间接影响着养分含量。交互探测表明两因子交互作用对养分的影响均强于单因子影响,说明了养分含量受各因素的共同作用,这与王琦等[15]、尉芳等[21]在该区域的研究结果一致。

4 结 论

(1) 根据全国第二次土壤普查养分分级标准,陕西黄土区整体SOM与TN处于较低水平,AP与AK分别为中等水平和较高水平,各土壤养分指标均属于中等变异水平。

(2) 4种养分最佳拟合模型均为指数模型,各养分呈现中等程度空间相关性,结构性与随机性因素的共同作用导致了研究区农田土壤养分含量的空间差异;全局Moran's I 指数表明,4种养分均呈现极显著正相关;克里金插值表明,SOM、TN、AP和AK含量区域差异明显,呈南高北低的特征;空间聚类分析表明,低值聚集区多分布于延安榆林一带,高值聚集区多分布于西安、宝鸡、渭南一带。建议陕北地区适当增加肥料投入,多采取保水保肥措施,关中地区进行精耕细作,提高粮食产量和养分利用效率。

(3) 年日照时长、年均气温、化肥用量和地貌类型对各养分含量空间变异特性解释力更强,两因子交互作用对养分的解释力均强于其单因子作用。在农田建设过程中,应注意影响作物产量的多方面因素,并根据不同地区土壤属性、地形条件、气候条件等因素因地制宜的进行人为活动。

参考文献(References):

[1] 贾鲁净, 杨联安, 封涌涛, 等. 宝鸡市农耕区土壤养分空间变异及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(12): 135-143. [Jia Lujing, Yang Lian'an, Feng Yongtao, et al. Spatial variation of soil nutrients and its influencing factors in Baoji City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(12): 135-143.]

[2] Cai A D, Xu M G, Wang B, et al. Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving soil fertility[J]. Soil & Tillage Research, 2019, 189: 168-175.

[3] 杨静涵, 刘梦云, 张杰, 等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分空间变异特征及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2020, 35(3): 743-754. [Yang Jinghan, Liu Mengyun, Zhang Jie, et al. Spatial variability of soil nutrients and its affecting factors at small watershed in gully region of the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(3): 743-754.]

[4] Sun G J, Liu H J, Cui D, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in Yili River Valley[J]. Peerj, 2022, 10: e13311.

[5] 张婵婵, 张瑞芳, 张建恒, 等. 高阳县农田土壤速效养分空间变异特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 758-764. [Zhang Chanchan, Zhang Ruifang, Zhang Jianheng, et al. Spatial variability of available nutrients contents in cropland soils in Gaoyang County of Hebei Province, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(6): 758-764.]

[6] Liu W J, Su Y Z, Yang Q, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in a typical oasis cropland ecosystem in arid region of Northwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(8): 2247-2257.

[7] Ji C H, Liu H L, Cha Z G, et al. Spatial-temporal variation of N, P, and K stoichiometry in cropland of Hainan Island[J]. Agriculture, 2022, 12(1): 39.

[8] 余慧敏, 朱青, 傅聪颖, 等. 江西鄱阳湖平原区农田土壤微量元素空间分异特征及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(1): 172-184. [Yu Huimin, Zhu Qing, Fu Congying, et al. Spatial variability characteristics and impacting factors of soil trace elements in Poyang Lake plain, Jiangxi of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(1): 172-184.]

[9] 夏凡, 王永东, 郑子成, 等. 小尺度下茶园土壤有效态微量元素空间变异特征及其影响因素分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(6): 1047-1054. [Xia Fan, Wang Yongdong, Zheng Zicheng, et al. Spatial variability of soil microelements in a small scale tea garden and the influencing factors[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2022, 28(6): 1047-1054.]

[10] 王婕, 牛文全, 张文倩, 等. 农田表层土壤养分空间变异特性研

究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 37-46. [Wang Jie, Niu Wenquan, Zhang Wenqian, et al. Spatial variability of soil nutrients in topsoil of cultivated land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 37-46.]

[11] 范声浓, 李华东, 王烁衡, 等. 基于IDW和因子分析的海南省火龙果园土壤养分空间分布预测[J]. 西南农业学报, 2023, 36(3): 602-611. [Fan Shengnong, Li Huadong, Wang Shuoheng, et al. Prediction of spatial distribution of soil nutrients in pitaya orchards in Hainan provinve based on IDW and factor analysis[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023, 36(3): 602-611.]

[12] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 黄土高原东部潇河流域农田土壤有机质时空变异及影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 96-104. [Xie Wenyan, Zhou Huaiping, Yang Zhenxing, et al. The spatial-temporal variation of soil organic matter and its influencing factors in Xiaohe River Basin in eastern Loess Plateau, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(1): 96-104.]

[13] 赵越, 罗志军, 廖牧鑫, 等. 泰和县耕地土壤养分空间分布及影响因素[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 296-303. [Zhao Yue, Luo Zhijun, Liao Muxin, et al. Study on the spatial distribution of soil nutrients and influencing factors in the cultivated land of Taihe county[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 296-303.]

[14] 胡贵贵, 杨联安, 封涌涛, 等. 基于地理探测器的宝鸡市农田土壤养分影响因子分析[J]. 土壤通报, 2020, 51(1): 71-78. [Hu Guigui, Yang Lian'an, Feng Yongtao, et al. Influencing factors of soil nutrients in farmland of Baoji based on geographical detector [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(1): 71-78.]

[15] 王琦, 常庆瑞, 黄勇, 等. 基于Geo-D的陕西省STN空间变异因子交互影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 161-169. [Wang Qi, Chang Qingrui, Huang Yong, et al. Driving factors and interaction of STN spatial variation in Shaanxi Province based on Geo-D [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 161-169.]

[16] Deng X J, Xu X L, Wang S H. The tempo-spatial changes of soil fertility in farmland of China from the 1980s to the 2010s[J]. Ecological Indicators, 2023, 146: 109913.

[17] 王学寅, 黄益灵, 全斌斌, 等. 浙江省瑞安市耕作层土壤养分元素有效态含量空间变异特征及其影响因素[J]. 现代地质, 2022, 36(3): 963-971. [Wang Xueyin, Huang Yiling, Quan Binbin, et al. Spatial variability characteristics and influencing factors of available contents of nutritive elements in tillage layer soil of Ruian, Zhejiang Province[J]. Geoscience, 2022, 36(3): 963-971.]

[18] 赵晴月, 许世杰, 张务帅, 等. 中国玉米主产区土壤养分的空间变异及影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(15): 3120-3133. [Zhao Qingyue, Xu Shijie, Zhang Wushuai, et al. Spatial regional variability and influential factors of soil fertilities in the major regions of maize production of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(15): 3120-3133.]

[19] 高浩然, 周勇, 王丽, 等. 基于Geodetector模型的鄂北岗地土壤有机质空间格局及影响因素分析——以枣阳市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(1): 166-178. [Gao Haoran, Zhou Yong, Wang Li, et al. Spatial pattern andinfluencing factors of soil organic matter based on Geodetector model: Taking Zaoyang City as an example[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(1): 166-178.]

[20] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[21] 尉芳, 刘京, 夏利恒, 等. 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 1097-1107. [Wei Fang, Liu Jing, Xia Liheng, et al. Environmental Science[J]. Spatial prediction method of farmland soil organic matter in Weibei Dryland of Shaanxi Province, 2022, 43(2): 1097-1107.]

[22] 雷琪, 蒋洪丽, 吴淑芳, 等. 西北地区有机质空间分布及其影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 274-279, 293. [Lei Qi, Jiang Hongli, Wu Shufang, et al. Spatial distribution of organic matter and its influencing factors in Northwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 274-279, 293.]

[23] 陈桂香, 高灯州, 曾从盛, 等. 福州市农田土壤养分空间变异特征[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(2): 216-224. [Chen Guixiang, Gao Dengzhou, Zeng Congsheng, et al. Characteristics of the spatial variation of soil nutrients in farmland of Fuzhou City[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(2): 216-224.]

[24] 郑然, 郑宝林. 冀北栗钙土区耕层土壤有机质和全氮的空间变异特征[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(5): 123-129. [Zheng Ran, Zheng Baolin. Spatial variation of organic matter and total nitrogen in cultivated soil in northern Hebei Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(5): 123-129.]

[25] 童童, 梅帅, 刘莹, 等. 基于GIS的环巢湖地区土壤养分空间变异特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1522-1531. [Tong Tong, Mei Shuai, Liu Ying, et al. Study on the spatial variation of soil nutrients in Chaohu Lake based on GIS[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(7): 1522-1531.]

[26] 王强, 郑梦蕾, 叶治山, 等. 基于Moran's *I*的菜地土壤属性空间分布格局分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2297-2306. [Wang Qiang, Zheng Menglei, Ye Zhishan, et al. Analysis of spatial distribution pattern of vegetable soil properties based on Moran's *I*[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2297-2306.]

[27] 顾思博, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆民丰县农田土壤微量营养元素含量及分布[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 142-149. [Gu Sibo, Zhou Jinlong, Zeng Yanyan, et al. Content and distribution of trace elements in farmland soil in Minfeng County, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 142-149.]

[28] 姜霓雯, 童根平, 叶正钱, 等. 浙江清凉峰自然保护区土壤肥力

指标空间变异及其影响因素[J]. 生态学报, 2022, 42(6): 2430-2441. [Jiang Niwen, Tong Genping, Ye Zhengqian, et al. Spatial variation of soil properties and its affecting factors of Qingliangfeng Nature Reserve, Zhejiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2430-2441.]

[29] 赵倩倩, 赵庚星, 董超, 等. 高密市农田土壤养分空间变异特征研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 643-650. [Zhao Qianqian, Zhao Gengxing, Dong Chao, et al. Spatial variability of soil nutrients of cultivated land in Gaomi Area[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(3): 643-650.]

[30] 姚瑶, 罗朋, 李京玲, 等. 运城市夹马口引黄灌区土壤养分空间变异特征[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(2): 134-141. [Yao Yao, Luo Peng, Li Jingling, et al. Spatial variation of soil nutrients in the Jiamakou Yellow River irrigation area, Yuncheng City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(2): 134-141.]

[31] 严玉梅, 李水利, 李茹, 等. 陕西省耕地土壤养分现状与分布特征[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1298-1305. [Yan Yumei, Li Shuili, Li Ru, et al. Current situation and distribution characteristics of soil nutrients in cultivated land of Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(6): 1298-1305.]

Main nutrient characteristics and influencing factors of farmland soil in the Loess Plateau of the Shaanxi Province

HE Junqi[1,2,3], BAI Hanwei[1,2,3], XU Yiwei[4], NI Lili[5]

(1. School of Water and Environmental, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Key Laboratory of Ecological Hydrology and Water Security in Arid Areas, Ministry of Water Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Shaanxi Science and Technology Exchange Center, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. Shaanxi Province Farmland Quality and Agricultural Environmental Protection Workstation, Xi'an 710003, Shaanxi, China)

Abstract: To explore the main soil nutrient characteristics and influencing factors of farmland in the Loess Plateau of Shaanxi, spatial analysis was conducted on the content of SOM, TN, AP, and AK using GIS and geostatistics methods based on the data from 5096 farmland sampling points with a depth of 0-20 cm in the study area. A geographic detector model was used to explore the degree to which 18 influencing factors explained the spatial variation of nutrients. The results showed that the average contents of SOM, TN, AP, and AK were 14.43 $g \cdot kg^{-1}$, 0.92 $g \cdot kg^{-1}$, 18.21 $mg \cdot kg^{-1}$, and 190.28 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively, showing moderate variation. The four best-fit models for nutrients were all exponential models, with moderate spatial correlation among each nutrient. The combined effect of structural and random factors causes spatial differences in the nutrient content. The global spatial correlation of nutrients is TN > SOM > AK > AP. The regional differences in nutrient content are significant, indicating a gradually increasing trend from north to south. The single-factor effects of annual sunshine duration, annual average temperature, fertilizer use, and geomorphic type have stronger explanatory power for spatial variation in nutrient content but lesser than that of the interaction between the two factors. Research has shown that it is necessary to increase fertilizer input in the northern Shaanxi region, perform intensive cultivation in the Guanzhong region, and consider multiple factors in farmland construction.

Keywords: main nutrients in soil; spatial variation; influencing factors; geological detector model; the Loess Plateau of Shaanxi Province